

リレンカレンの形状とそれを規定する要因： 従来の研究のレビュー

Rillenkarrren on Limestone Pinnacles: A Brief Review

松倉 公憲*

Yukinori MATSUKURA*

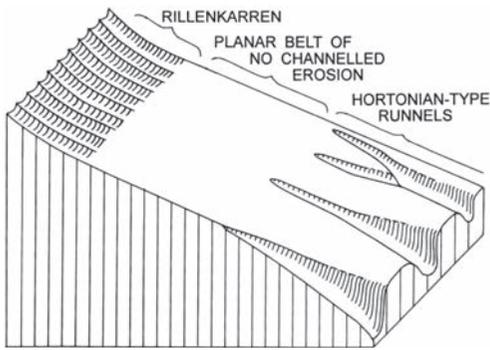
1 はじめに

石灰岩のような可溶性の岩石において、雨水や地表流、土壌水、地下水などの溶解作用によって、露頭表面に形成される種々の溝状の微地形を総称してカレン (Karren: 独語) あるいはラピエ (lapiés: 仏語) という。カレンを最初に系統的に論じたのは Bögli (1960) であり、その後 Jennings (1971), Sweeting (1972), Ford and Williams (1989) によって各種の分類が試みられている (分類に関する研究史については、中村 (1991) や羽田 (2005) に詳しい)。たとえば、Ford and Williams (1989) によれば、カレンは以下の4つに分類される: (A) ピットやパンなどの円形の穴、(B) 割れ目にコントロールされてできた直線状の形状: splitkarren や grikes または kluffkarren、(C) 流水にコントロールされてできた直線状の形状: microkarren (microrills), rillenkarrren, rinnenkarren (solution runnel), decantation runnel, decantation flutings, fluted scallops または solution ripple、(D) karrenfeld や limestone pavement などの複合形。

本稿で扱うのは、この中の直線上の溝である rillenkarrren (漆原和子編著「カルスト」のカルスト用語集によれば、この語は「条溝カレン」と

訳されているが、あまり使用例を見ないことから、本稿では「リレンカレン」としておく) である。リレンカレンの一般的な形状を第1図に示した。たとえば、三浦 (1996) によれば、リレンカレンとは、「緻密な岩質の石灰岩に形成される。岩石表面の傾斜 40-80 度の斜面に、最大傾斜方向に伸びた溝が並列する溶食溝群である。浅い丸底の溝が縦長に並び、溝と溝の間は鋭い畝をなし、その形状は揃っていて、溝の幅は 1-4 cm 深さは 1-2 cm の規模を一様に保持した波頭状の断面計を示し、その長さは発生する場所によって違いはあるが、おおむね数 10 cm である。石灰岩露頭における尾根状の突出部の両側に規則的に群をなして生じ、降下してきた雨水がまだ比較的高濃度の CO₂ を含んでいる尾根付近でもっとも完全に発達し、斜面下方で溝の起伏は鈍化し、やがて消失する。……」とまとめられている。また、リレンカレンの先駆的な研究となった Bögli (1960) によれば、リレンカレンの特徴は以下のようにまとめられている: (1) リレンカレンは、水の流れが遅くなる水平面や水平に近い面には形成されない; (2) 急な斜面にでき易く、斜面が急なほどリレンカレンは大きくなる; (3) 高温なほど化学的反応が活発なので、熱帯で最も発達が良く、大きさも大きくなる; (4) 冷涼なあるいは積

* 筑波大学大学院生命環境科学研究科



第1図 リレンカレンの模式図
(Ford and Williams, 1989, Fig. 9.3 の一部を引用・改変)

雪に覆われるような場所では発達が悪い；(5) 降雨強度が大きいほど形成されるリレンカレンの長さも大きくなる；(6) 幅は2-3 cmであることが多く、その地域差は小さい。

このBögli (1960)の研究以来、およそ30編ほどのリレンカレンに関する研究が報告されてきているが、(1) その大きさ(長さ、幅、深さなど)が何によってコントロールされているのか、(2) その形成速度はどのようなものか、などに関して不明な点が多い。本稿は、このような従来のリレンカレンに関する研究をレビューするものであり、そのことから今後の研究の展望を考えてみたい。なお、リレンカレンは、石灰岩以外の岩石にもできるという報告もあるが(たとえば、ハワイの玄武岩：Palmer, 1927, アイルランドのドレイイト・シル：Reynolds, 1961, 花崗岩：Twidale, 1982, pp. 267-279；Migoń, 2006, pp. 149-153, 砂岩：Williams and Robinson, 1994 など)、本稿では石灰岩を含む炭酸塩岩等の可溶性の岩石(物質)に形成されるものに限って議論することにする。

II リレンカレンが形成される場の条件

リレンカレンが形成されるのは、主に石灰岩の露岩表面である。第1図にも示されているよう

に、地形場としてはある程度傾いた面が必要であり、しかもその面上でもとくにその上部において形成されやすい。たとえば、この図では、露岩のクレストから斜面上部にかけての部分にリレンカレンが形成されており、中部ではリレンカレンが形成されず平坦な溶解表面(“Ausgleichsfläche”とも呼ばれる(Bögli (1960)))となっている。そして下部には、通常の流水のできる(Hortonian)侵食リルが形成されている。

リレンカレンの形成される地形場としては、ピナクルの頂部付近がもっとも適している。しかし、リレンカレンがどのような場に形成されているかに関する情報は、多くの論文でそれほど明確にされている訳ではなく、そのため形状の測定もどのような地形のところで行ったか不明な場合も多い。

Bögli (1960)がまとめたように、リレンカレンは緩勾配な斜面には形成されにくく、またその逆に急すぎる斜面にも形成されないようである。たとえば、Sweeting (1972)は、リレンカレンの発達が最も良いのは40°から80°(とくに60°から80°)の傾斜のところであると報告している。また、Piggott and Shakesby (1980)によれば、40°以下の斜面ではリレンカレンの発達は悪く、発達のいいのは60°付近の斜面であると指摘されている。オーストラリアのCoolman PlainとWee Jasperでの観察から、Dunkerley (1979)は、リレンカレンの形成される最小勾配斜面が24°と17°であり、形成場の平均は40°と46°であることを示した。また、Goudie *et al.* (1989)は、同じオーストラリアのNapier Rangeでの観察から、樹枝状や直線状の本来のリレンカレンは35°から80°の傾斜のところ的形成されており、それより急になると、箱形のカレンに形状を変化させることを報告した。一方、世界の8箇所でのリレンカレンを観察したMottershead *et al.* (2000)のデータをみると、リレンカレンの形成されている斜面の勾配は20°から66°までばらついており、

必ずしも高い勾配にのみ形成されてはいない。

以上のことから、リレンカレンが特に顕著に発達する勾配があるわけではないようである。しかし、リレンカレンは直接の降雨によって形成されるものであることは間違いないであろう。なぜならリレンカレンは溶解によって形成されるものであり、溶解に寄与する水の供給源は、このような形成の地形場から降水以外には考えられないからである。

III リレンカレンの形状

第1図にも示されているように、リレンカレンは、規則正しい形状と大きさをもった直線的な溝の地形である。たとえば第2図には、秋吉台のピナクルに発達しているリレンカレンを示した。このようにリレンカレンは基本的には小さな縦溝の集合体である。溝は半円形をしており、溝と溝の間は鋭く尖った稜をなす。したがって、リレンカレンの形状値としては、長さ、幅、深さがある。長さはリレンカレンの最上部から消失する最下端部までの長さ、幅は稜と稜との間の長さ、深さは溝の最大深ということになる。ただし、深さについては、溝が斜面上に発達するものであるので、垂直深をとるか鉛直深をとるか、特に傾斜が大きいところでは値がかなり異なるはずであるが、そのことに注意を払って計測している研究者は少ないようである。

地形研究者にとっての基本的なデータ採取としては、対象とする地形種の形状計測がある。従って、リレンカレンの研究者の多くも、それぞれ各自の研究対象地域にみられるリレンカレンの地形形状値（すなわち、長さ・幅・深さ）を計測している。Dunkerley (1979) は、深さの代わりに、リレンカレンの断面形（断面の曲率や断面積）を計測している。ところで、リレンカレンの幅は1 cm 程度であり、深さは1 cm 以下というような小さなものであるため、一般的には、その幅や深

さの計測には、建築現場で使われる「型どりゲージ」が使われる。

第1表は、従来の研究で計測されたリレンカレンの形状値をまとめたものである。ヨーロッパとオーストラリアにおけるデータが多いようである。表の最下部にはGlew and Ford (1980)、羽田 (2008) によって行われた室内実験において形成されたリレンカレンのデータを掲載してある。アジア以外の地域におけるデータをみると、リレンカレンの長さは11 cm から44 cm までばらばらしているが、その幅については二、三の例外を除くと1-2 cm 程度と揃っている。同様に深さも1 cm 以下のものが多く、値の幅は小さい。それに対し、アジア地域のデータは、いずれの形状値も他の地域に比較して大きくなっている。たとえばヒマラヤでは長さが50-200 cm と大きく、深さも3-5 cm と大きい。また、日本におけるデータ (羽田, 2007) も幅がいずれも3 cm 台と他地域に比較して若干大きいようである。そして羽田 (2007) によって計測されたスロベニアのデータが、ヨーロッパの値よりも日本の値に近いことは興味深い。

ところで、Glew and Ford (1980) はPlaster of Paris (gypsum, 焼き石膏) と岩塩の上に人工降雨を降らせリレンカレンをつくる実験をおこなった。その結果、石膏にできたリレンカレンの幅は自然の野外で石灰岩にできるものよりかなり



第2図 秋吉台のピナクル上に発達するリレンカレン

第1表 リレンカレンの形状値データ一覧（地域別に並べてある：上から順に，ヨーロッパ，北米，アフリカ，オセアニア，アジア・日本，室内実験のデータ）

Location	Mean Length (in cm)	Mean Width (in cm)	Mean Depth (in cm)	Rock Type	Source
Central Europe	< 50	2-3		Various limestones	Bögli (1960)
Europe	11.8			Various limestones	Heinemann <i>et al.</i> (1977)
Yugoslavia	16.0	1.70		Medium cryst. limestone	Lundberg (1976)
Valencia, Spain	12.2	1.8	0.40	Limestone (Cretaceous)	Gil-Senis (1992)
Lluc, Mallorca, Spain		1.0-2.5		Fine-grained limestone	Piggott & Shakesby (1980)
Lluc, Mallorca, Spain	24.2	1.72	0.46	Fine-grained limestone	Mottershead (1996)
Lluc, Mallorca, Spain	22.0	1.70	0.44	Fine-grained limestone	Mottershead <i>et al.</i> (2000)
Lluc, Mallorca, Spain	19.0	1.82	0.42	Fine-grained limestone	Crowther (1998)
Es moli, Balears, Spain	28.0	1.51	0.53	Limestone	Mottershead <i>et al.</i> (2000)
England & Wales		1.68-2.09		Limestone (Carboniferous)	Vincent (1996)
Black Head, Co. Clare, Ireland	30.0	1.60	0.35	Limestone (Carboniferous)	Mottershead <i>et al.</i> (2000)
Lassithi, Crete, Greece	32.0	2.06	0.72	Limestone	Mottershead <i>et al.</i> (2000)
Lipica, Slovenia		3.6 (2.4-5.1)	1.5 (0.7-3.2)	Limestone	羽田 (2007)
Rocky Mts. Canada		1.25-1.45		Medium to fine, cryst. limestone	Glew & Ford (1980)
Griqualand West, South Africa		1.76		Dolomite limestone	Marker (1985)
Namib Desert	17.3-20.7	2.19-2.99	0.15-0.3	Fine-grained marble	Sweeting & Lancaster (1982)
Chillagoe, Queensland, Australia		1.52	0.44	Recrystallined, coarse limestone	Lundberg (1977)
Chillagoe, Queensland, Australia		1.95	0.84	Sparry Fossiferous limestone	Lundberg (1977)
Chillagoe, Queensland, Australia		2.02		Sparry Fossiferous limestone	Lundberg (1976)
Chillagoe, Queensland, Australia	22.5, 33.5	1.74, 2.08		Recrystallined, coarse limestone	Dunkerley (1983)
Coolman Plain, New South Wales	11.6	1.60		Coarse-grained limestone	Dunkerley (1979)
Wee Jasper, New South Wales	34.8	1.90		Fine-grained limestone	Dunkerley (1979)
Wee Jasper, New South Wales	44.0	4.09	1.66	Fine-grained limestone	Mottershead <i>et al.</i> (2000)
Buchan (Wilson), Victoria, Australia	35.0	2.27	1.29	Limestone	Mottershead <i>et al.</i> (2000)
Buchan (Main Reserve), Australia	35.0	2.25	0.39	Limestone	Mottershead <i>et al.</i> (2000)
Buchan (Pot Hole), Australia	20.0	1.70	0.25	Limestone	Mottershead <i>et al.</i> (2000)
Napier Range, Western Australia		1.95		Limestone (Devonian)	Goudie <i>et al.</i> (1989)
Yarrongobilly, Australia	41.0 & 20.0			Fine-grained limestone	Jennings (1982)
Owen Range, New Zealand	20.0			Coarse-grained limestone	Jennings (1982)
Kashmir, northwestern Himalaya	50-200	3-7	3-5	Limestone	Mazari (1988)
Gunnung Mulu, Sarawak	40.0	1.62	0.2-1.5	Limestone	Osmaston & Sweeting (1982)
秋吉台、山口・日本		2.4	0.5-1.5	Limestone	中村 (1991)
秋吉台、山口・日本	10-60	2-5	0.4-1.6	Limestone	網本 (1992)
秋吉台、山口・日本		3.7 (1.7-6.5)	0.9 (0.2-2.1)	Limestone	羽田 (2007)
平尾台、福岡・日本		3.8 (2.0-7.6)	0.7 (0.2-2.1)	Marble	羽田 (2007)
山里、沖縄・日本		3.1 (1.5-6.4)	1.3 (0.4-4.2)	Limestone	羽田 (2007)
Laboratory simulation	14.0	0.55 & 1.75		Plaster of Paris & Salt	Glew & Ford (1980)
<i>ditto</i>		0.2-0.3	0.05-0.2	Plaster of Paris	羽田 (2008)

小さかったが（幅が0.55 cm）、岩塩には石灰岩とほぼ同じ大きさのものが形成された（幅が1.75 cm）。また、最近、羽田（2008）も石膏ブロックの45度斜面上にリレンカレンをつくり出すことに成功しているが、その幅は0.2–0.3 cm、深さは0.05–0.2 cm とかなり小さいものである。しかし実験によるデータは少なく、これだけで野外のデータとの比較をするのは難しい。

IV リレンカレンの形状を コントロールする要因

1. 斜面勾配等の地形場の影響

斜面勾配とリレンカレンの長さに関しては多くの論文で議論されているが、その結論は多様であり、統一見解が得られてはいないようである。たとえば、Sweeting（1972）は、リレンカレンが最も発達がいいのは60°から80°の傾斜のところであるが、リレンカレンの長さは露出した斜面の長さに依存することを示した。多くの研究者は、傾斜が大きくなるほど長さも長くなることを示している。しかし、Heinemann *et al.*（1977）は、最も長いものは60°周辺の斜面に形成され、もう一つの形成のピークは25°付近の斜面にあるということを示した。Glew and Ford（1980）の実験では、リレンカレンの長さとう配の間には強い相関のあることが示された。また、彼らのロッキー山脈やスロベニアなどの野外における石灰岩の計測によれば、長さとう配の間には単純な相関が見られるが、しかしそのプロットはばらついているという。

Ginés（1996）はマリョルカ島の標高150 m～1150 m に分布するリレンカレンの幅と深さを計測しているが、標高と幅には関連性がないが、標高が高いほど深さと長さは小さいことを指摘している。

2. 降雨や気温（風化環境）の影響

岩石が溶解することによりリレンカレンが形成

されるとすると、溶解を促進させるものとしての雨（雨量、雨滴の大きさ、降雨強度、雨水の化学組成やpHなど）や気温等がリレンカレンの形状を決める重要な要因となろう。しかし、どのような環境がどのようなリレンカレンを形成させるのかに関する統一的な見解はないようである。特に深さについていえば、溶解が進むほど深さが増大するように思えるが、ヒマラヤの3–5 cm のデータを除くと、従来の報告された多くのものは1 cm 以下である。このことは幅（W）と深さ（D）の比（W/D）には限界値がある可能性もある。たとえば、Mottershead *et al.*（2000）のデータによれば、この比の最小は2.33 と与えられているが、しかし、この値の意味することは議論されていない。

リレンカレンの大きさと雨量の関係についても、あまり明瞭な説明はなされていないようである。その理由の一つは、野外の場合は、形成要因の中から降雨だけの影響を単独に抽出することが難しいからであろう。

Dunkerley（1979）によると、気温が10度上昇すると2倍の溶解量になることから、リレンカレンの形成には、降雨強度や水理学的特性よりも、石灰岩の溶解特性や気温が効果的であるという。したがって、多くのカルスト研究者が指摘しているように、熱帯の暖かい地域においては、リレンカレンは温帯や寒帯の地域のそれより発達がよく、その形状も、より長く、より広く、より深くなるはずである。実際、これらのことはいくつかのデータによって支持されているが、しかし明確な結論が出ているわけではない。というのも、もし気温の高いところでリレンカレンの発達がよいということが事実であっても、その関係は温度による粘性の減少の効果によって説明されるというFord and Lundberg（1987）の主張があるからである。

Glew and Ford（1980）は、リレンカレンの形成には雨滴の大きさが重要であると主張してい

る。羽田 (2008) の実験では、直径 0.8 mm の雨滴ではリレンカレンが形成されず、0.4 mm の雨滴によってリレンカレンが形成されたという。また、Sweeting (1972, p. 81) はアドリア海岸にリレンカレンが広く発達するのは冬の豪雨が強く影響しており、ブリテン島にリレンカレンの発達があまり良くないのは、そこでは霧雨 (こぬか雨) しか降らないからであると解釈した。そして彼女は、露岩表面の豊富な地衣類や他の植物の成長がリレンカレンの形成を小さくする、と主張した。しかしこれに対し Heinemann *et al.* (1977) は、カナダのロッキー山脈の Surprise Valley において、岩石表面に存在する地衣類がリレンカレンの形成にほとんど影響しないことを示した。

3. 岩石・岩質の影響

Sweeting (1972: pp. 80-81) が、ドロマイトや軟らかい石灰岩では、リレンカレンがたとえ形成されてもすぐ破壊され、地形として残りにくい (結果として形成されにくい) と主張して以来、石灰岩の岩質とリレンカレンの形成・形状に関する議論も数多くなされてきた。たとえば、Dunkerley (1983) は、粗い岩石組織をもった岩石ではピットや小さな runnel ができやすく、リレンカレンは形成されにくいと主張している。また、Marker (1985) は南アフリカの Transvaal 地方におけるリレンカレンは、ある特定の岩質のところに限定されていることを示した (このことは降雨の強さがリレンカレン形成の第一の規制要因ではないことを示している)。しかし様な岩石組織がリレンカレンの形成にとって、かなり重要であることは示されているものの、間隙率などの物性と何か有意な関係があるかどうかについての明瞭な関係は示されなかった。また、Osmaston and Sweeting (1982) は、密度が高く細粒の硬い石灰岩 (シュミットハンマー反発値が 56) にリレンカレンが形成されていることを報告している。さらに、Sweeting and Lancaster

(1982) は、ナミブ砂漠においては、物理的風化に対する抵抗力の大きい細粒で等質な大理石に、リレンカレンの発達がいいことを報告している。

Ford and Lundberg (1987) によって、リレンカレンと岩石の関係は以下のようにまとめられている: (1) 岩石組織は特に重要な要因であり、最もよくリレンカレンが発達するのは岩石組織が均一 (等質) であるところであり、そして粒径が中粒から細粒であるところである; (2) たとえば、露頭が安定であれば、等質な石膏や岩塩ではリレンカレンがみられる; (3) リレンカレンは粗粒なところでも形成されることがあるが、それは稀である; (4) ドロマイトでも形成は稀である (なぜならドロマイトは一般的に粗粒であり表面の凹凸が大きいため); (5) 岩石が不均質な場合 (たとえば粒径分布が広い岩石など) は形成されにくい; (6) 溶解し難い珪質の化石などが含まれる場合 (たとえば、「がま」などの空隙などがある場合) は形成は稀である; (7) 岩石が結晶の *grus* に分解するような岩石の場合も、リレンカレンの形成は稀である。

Dunkerley (1979, 1983) は、オーストラリアのいくつかの地域における調査結果をもとに、リレンカレンの長さや岩石の粒径の間には以下の関係があることを主張している。すなわち、粗粒な Coleman Plain 石灰岩には短いリレンカレンが発達し、細粒な Wee Jasper 岩石には長いリレンカレンが発達しているという。そして Chillagoe での粗粒岩においても、同様の長いリレンカレンが発達している。しかし一方で、Lundberg (1976, 1977) は、同じ Chillagoe での粗粒で結晶質である石灰岩に形成されている小さいリレンカレンは、単純に若い (形成時間が短い) ものであると考えた。なぜならそれらの岩石は粒状風化や剥離によって破壊され続けているからである。

同様に、リレンカレンの幅と岩石の粒径との関係を見ると、Glew and Ford (1980) の実験の結果から、幅の狭いリレンカレンが細粒で等質な石

膏の上につくられ、幅の広いものが粗粒で等質な岩塩につくられていることがわかる。しかし、両者の岩石の化学組成が異なっていることから、形成されたリレンカレンを単に粒径の効果だけから説明するのは厳密には正しくないであろう。比較をするためには、同じ化学組成をもち粒径だけが異なる物質でリレンカレンをつくる実験をすべきであろう。

Goudie *et al.* (1989) は、オーストラリアの Napier Range におけるリレンカレンの発達に寄与するデボン紀の石灰岩の詳細な岩石物性の調査を行った。おもな調査項目は、岩石硬度、不溶性物質の含有量、吸水率、薄片観察 ((A) ファブリック観察 (すなわち、内砕屑物に富むか、化石に富むか、オーライトに富むかという判別); (B) セメント物質の組み合わせとその量 (すなわちマイクライトとスパーライトの組み合わせとそれぞれの量); (C) 鉱物組成 (すなわちカルサイトとドロマイトの量比) などである。その結果、シュミットハンマー反発値 (R 値) が 50 以上の硬いものにしかリレンカレンが形成されないことがわかった。しかし、R 値が 50 以上でもリレンカレンが形成されない岩石もあり、R 値 = 50 はリレンカレン形成の必要条件ではあっても十分条件ではないようである。また R 値以外の分析結果からリレンカレンの形成を説明する岩石物性を導き出すことには成功していない。

また、Mottershead *et al.* (2000) は、石灰岩と石膏、岩塩にできるリレンカレンを比較することにより、リレンカレンの形成に寄与する岩石物性を知らうと考えた。しかし、石灰岩にできるリレンカレンが岩塩にできるものより大きい、ということは判ったが、岩石物性とリレンカレンの形状との関係に関する明瞭な結論を導びくには至らなかった。

以上を概観すると、硬くて等質で粒径の細かい岩石においてリレンカレンが発達し易いことが多いの研究で主張されているが、その形状に与える

岩石物性の影響に関する共通理解はほとんどないようである。

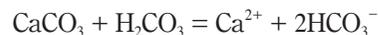
V リレンカレンの起源と形成プロセスと形成速度

1. リレンカレンの起源と形成プロセス

リレンカレンの形成プロセスに関しては、Ford and Lundberg (1987) に要約されているので、それを以下に紹介する。

リレンカレンの形状がどのようにして形成されるのか、ということに関する 2 つの基本的に異なった主張がある。一つは Bögli (1960, 1980) に代表されるような、化学的溶解によるという考えと、もう一つは Glew and Ford (1980) の主張する物理的プロセスによるという考えである。

リレンカレンの初期の研究として有名な Bögli (1960, 1980) は、リレンカレンの形成を、以下のように説明している。リレンカレンの形成は CO_2 との反応による CaCO_3 の溶解による結果である。



この反応は極めて迅速 (数秒以内) に起こると考えられる。次のステージ (リレンカレンを形成するプロセス) は水溶液中の CO_2 の水和作用である。



このプロセスは非常に長い時間が必要となる。

このモデルのエッセンスは、雨滴中での H_2CO_3 あるいは H^+ の瞬間的な反応がリレンカレンの峰の部分で、あるいは他の雨滴が当たった最初の地点において最大になるということである。そして反応はリレンカレンの下部 (すなわち斜面の下方) に行くに従い消費されてしまう。リレンカレンの下方に形成されている Ausgleichsfläche は

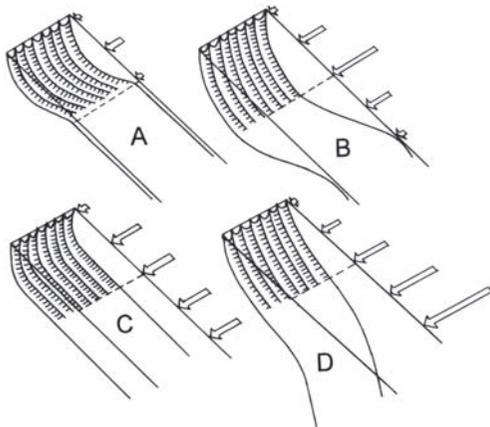
溶解が少ないゾーンであり，そこでは溶解の能力を CO_2 の摂取によって，再度取り戻すことができる。

一方，彼の説明に対し，Ford and Lundberg (1987) は以下のような疑問を呈している（第3図参照）。すなわちリレンカレンに比較して Ausgleichsfläche における溶解速度が小さくなることである。Bögli (1960) の化学モデルによれば，リレンカレンの下部を通過するとほとんど侵食力がなくなることになる（第3図A参照）。しかし，彼自身のダイアグラムではここが最大の侵食域になっている（Bögli 1980, 第3図B）。それに対し，Glew and Ford (1980) はマイクロメーターで低下速度を計測したが，その結果，リレンカレンと平坦面の両者共に同じ速度で除去されることを示した（第3図C：このプロファイルが野外で最も普通に見られるものであるということは興味深い）。

Ausgleichsfläche を伴ったリレンカレンが石膏や岩塩にも発達するという事実は，石灰岩上でリレンカレンが化学的なプロセスで発達するという主張を否定することになる（Glew and Ford,

1980）。なぜなら，石膏や岩塩は水が存在するだけで単純な解離によって溶解することと， CO_2 の摂取などのような化学反応がその溶解プロセスを妨害したり加速させたりすることはないからである。Glew and Ford (1980) は，彼らの実験結果から，彼らのモデルから計算された溶解量は1%飽和よりも小さかったことを見つけた。そして彼らは，リレンカレンと Ausgleichsfläche の両者において，そこでは溶解鉱物が存在するかどうかに関係なく溶解作用が強く残存していることがわかった。

Glew and Ford (1980) の実験は以下のことを示唆している：(1) リレンカレンは，峰から形成が始まり，その長さが安定なものになる所までは，下に向って形成される，(2) リレンカレンは峰で数多くの短く浅いリルとして形成され始める。そしてそれらは徐々に深くなり長くなり，横に連結し，そして，より小さな hanging リルを消滅させる，(3) 表面の横の端にあるリルは長い，なぜならここでは薄い流れが保持されるからである。リレンカレンの横断形は，平衡時には（下に凸の）放物線の形に近くなる。また，彼らは，石灰岩の表面が削剥される低下速度は，雨の強さと傾斜に依存することを示した（実験においては，最大の低下（削剥）速度は 45° の周辺で起こる）。そのことを基に，以下のような物理的「リム効果」モデルが提案された：(1) クレストのリムでは雨滴は，岩石表面での乱流反応を可能にするように，飽和した粘性のある薄い流れの下層を通して滲入する；(2) クレストから下流方向に向い，流れの深さは，もはや雨滴が岩石表面に直接衝撃を与えないような，ある限界値になるような所（すなわちリム効果がもはや及ばない所）までは増加する；(3) リレンカレンはリム効果の及ぶ範囲内にある限り，特徴的に安定な形状をもつ。放物線型の横断形は，溝の側壁に与える雨滴の衝撃を最小に抑える最も効果的な形状であり，したがって水のエネルギーを溝の中央部分に集中させ



第3図 リレンカレンの縦断形
細い線は岩盤表面のオリジナルな形状を示し，矢印はそこでの侵食速度の大きさを示している（Ford and Lundberg, 1987, Figure 4 を引用，一部改変）

ることができる。

一方、横断形状についていえば、Dunkerley (1983) はリレンカレンの形状を双曲線型として記載した。しかし放物線型であろうが双曲線型であろうが、上に凹な形状であれば、どんな形状であっても、水のエネルギーを集中させることができるので、そのことは特に問題にはならないであろう。

また、リレンカレンの形成に biokarst (生物カルスト作用) が関与しているという主張もある。Fiol *et al.* (1996) は、藻類が石灰岩の表面を溶解し、結晶構造を弱くすると、雨滴の衝撃による侵食がより効果的になり、それがリレンカレンの形成を促すことを主張した。

2. 形成速度

Sweeting (1972, p.81) によれば、リレンカレンはほんの数ヶ月で形成されることもあるという。地中海地域においては、歴史時代の森林伐採や土壌浸食によって新しく露出した岩石 (ピナクル) の表面にリレンカレンが形成されていることは、歴史時代に溶解が進行したことを示している。彼女は解釈した。

一方、Dunkerley (1983) は石灰岩にリレンカレンが発達するのに 2600 年の時間が必要であると示唆した (これは、リレンカレンで採水し硬度を計測 (その値は 30 mg/litre)。降雨の 75% が露岩面を流れ、1 年間に 46 mg の石灰岩を溶解する: すなわち 60 度の斜面上の幅 1.9 cm 長さ 27 cm のリレンカレンにおいて溶解すると仮定して計算したものである。リレンカレン形成のために除去された部分の体積は 45 cm³ であるので、それに見合う重量を 1 年間に 46 mg という溶解量で割ると 2600 年が必要という計算になる)。Glew and Ford (1980) は、実験によって安定したリレンカレンの形状ができるのに要する時間は 250-350 時間であることを示している。同様に、羽田 (2008) によっても、リレンカレンの形状が平衡形に達するのは実験開始後数 100 時間である

ことが示されている。

VI リレンカレンの研究における今後の課題

リレンカレンは、カルスト地形の中では微地形に属するが、雨滴の当たる石灰岩の露岩表面には普遍的に見られるものであり、その研究も少なくはない。本稿では、それらの研究をレビューしたが、その結果リレンカレンには未解明な問題の多いことがわかった。以下にそれらをまとめるとともに、今後取り組むべき課題について提言する。

- (1) リレンカレンは、一般的にはピナクルなどの頭部に形成されることが多いようであり、形成の地形場が重要だと思われる。しかし多くの研究では、形状の把握に主眼が置かれており、論文中に地形場の情報がほとんどないようである。石灰岩の形成されている地形場の情報を正確・詳細に把握・報告する必要がある。
- (2) 形状に関する情報は多い。しかし、その計測法 (たとえば深さは垂直深なのか鉛直深なのか) やデータの数やその処理の方法が論文によって異なるという問題がある。このことが、他地域のリレンカレンと比較するのを躊躇させる要因となっている。標準的な計測数や統計処理に関する指針の提示が望まれる。
- (3) アジア地域にみられるリレンカレンの形状値が、ヨーロッパやオーストラリア地域のそれに比較して、若干大きいのはどのような理由によるのであろうか。また、羽田 (2007) によって計測されたスロベニアのデータが、ヨーロッパの値よりも日本の値に近いことは興味深い。
- (4) リレンカレンの形成に関して、岩石物性からのアプローチが極めて少ない。Goudie *et al.* (1989), Mottershead *et al.* (2000) などの研究があるだけであり、しかも彼らの研究

謝辞

本研究を行うに際し、学術振興会・科学研究費・基盤研究B(課題番号19300305 研究代表者・松倉公憲)を使用した。

文献

- においても、どのような岩石物性がリレンカレンの形状をコントロールしているかの明瞭な解はないようである。Glew and Ford (1980) や羽田 (2008) による室内実験からのリレンカレン形成へのアプローチは非常に興味深いものである。このような実験をより多く積み重ねることにより、リレンカレンの形成に関与する要因(たとえば、水の流れ方・石灰岩の溶解と流水との関係・雨量(流量)、乾燥と水との接触時間の割合など)の重要度を知ることが必要であろう。
- (5) 溶解する側の環境の要因の解明も重要であろう。Sweeting (1972) は降雨が強くなければリレンカレンが形成されない、と主張しているが、定量的なデータで裏付けられたものではない。一方で、雨滴の大きさや気温が重要という指摘もあり、残された問題点も多い。
- (6) 上述したように、室内実験においては、数100時間でリレンカレンの形状は平衡形になるという報告があるが(Glew and Ford, 1980; 羽田, 2008), リレンカレンの形成時間に関する野外データはほとんどない。したがって、たとえば、眼前にあるリレンカレンが、その発達過程のどの段階にあるのかは現状では全く推測すらできない。このことは場所の異なるリレンカレン同志を比較する時には問題となろう。すなわち、形成速度がかなり速く、いわゆる平衡形が維持される時間が長い場合は問題にならないが、形成速度が小さい場合には問題となろう。最近、宇宙線生成放射性核種を用いた侵食速度に関する研究が増加しつつある。石灰岩の場合には、各種としてCaをターゲットに生成する ^{36}Cl (半減期: 0.3 Myr)が応用できる可能性がある(松四ほか, 2007; 2008)。
- 網本 昇 (1992): 秋吉台における溶食条溝の形態について. エリア山口, **21**, 11-18.
- 中村 学 (1991): 秋吉台カルストにおけるカレンの形態の研究. 三浦 肇編: 秋吉台カルストの地理. 三浦 肇教授退官記念事業会. 25-56.
- 羽田麻美 (2005): カレンの研究史とカレンの発達過程にもとづく分類の一試案. 法政地理, **37**, 25-34.
- 羽田麻美 (2007): 日本とスロベニアの炭酸塩岩地域におけるリレンカレンの形態の差異. 地形, **28**, 41-52.
- 羽田麻美 (2008): 室内実験による石膏ブロック上のリレンカレンの形成過程. 地形, **29**, 301-311.
- 松四雄騎・笹 公和・高橋 努・長島泰夫・松倉公憲 (2008): In situ ^{36}Cl を用いた石灰岩ピナクルの溶食速度推定. 地形, **29**, 80-81.
- 松四雄騎・若狭 幸・松崎浩之・松倉公憲 (2007): 宇宙線生成核種 ^{10}Be および ^{26}Al のプロセス地形学的应用. 地形, **28**, 87-107.
- 三浦 肇 (1996): 条溝カレン. 漆原和子編「カルスト: その環境と人びとのかかわり」大明堂, 325p.
- Bögli, A. (1960): Kalklösung und Karrenbildung. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., Suppl. Bd., **2**, 4-21.
- Bögli, A. (1980): *Karst Hydrology and Physical Speleology*. Berlin, Springer-Verlag, 284p.
- Crowther, J. (1998): New methodologies for

- investigating rillenkarren cross-sections: a case study at Lluc, Mallorca. *Earth Surface Processes and Landforms*, **23**, 333-344.
- Dunkerley, D. L. (1979): The morphology and development of Rillenkarren. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., **23**, 332-348.
- Dunkerley, D. L. (1983): Lithology and micro-topography in the Chillagoe karst, Queensland, Australia. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., **27**, 191-204.
- Fiol, Ll., Fornós, J. J. and Ginés. A. (1996): Effects of biokarstic processes on the development of solutional rillenkarren in limestone rocks. *Earth Surface Processes and Landforms*, **21**, 447-452.
- Ford, D. C. and Lundberg, J. (1987): A review of dissolutional rills in limestone and other soluble rocks. *Catena*, Suppl. Bd., **8**, 119-140.
- Ford, D. C. and Williams, P. W. (1989): *Karst Geomorphology and Hydrology*. Chapman & Hall, London, 601p.
- Gil-Senís, M. V. (1992): Quantitative analysis of solution flutes in La Safor Karst, Valencia, Spain. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., Suppl. Bd., **85**, 89-100.
- Ginés, À. (1996): Quantitative data as a base for the morphometrical definition of rillenkarren features found on limestones. In Fornós, J. J. and Ginés, À. (eds) *Karren Landforms*, Palma, 177-191.
- Glew, J. R. and Ford, D. C. (1980): A simulation study of the development of rillenkarren. *Earth Surface Processes and Landforms*, **5**, 25-36.
- Goudie, A. S., Bull, P. A. and Magee, A. W. (1989): Lithological control of rillenkarren development in the Napier Range, Western Australia. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., Suppl. Bd., **75**, 95-114.
- Heinemann, U., Kaaden, K. and Pfeffer, K. -H. (1977): Neue Aspekte zum Phänomen der Rillenkarren. *Abhandlungen zur Karst und Höhlenkunde*, Reihe A, **15**, 56-80.
- Jennings, J. N. (1971): *Karst*. MIT Press, Cambridge (Mass.) & London, 252p.
- Jennings, J. N. (1982): Karst of northeastern Queensland reconsidered. *Tower Karst, Chillagoe Caving Club*, Occ. Pap. **4**, 13-52.
- Lundberg, J. (1976): The geomorphology of Chillagoe limestones: variations with lithology. *Unpublished M.Sc. thesis, Aust. Nat. Univ., Canberra*.
- Lundberg, J. (1977): An analysis of the form of rillenkarren from the tower karst of Chillagoe, North Queensland, Australia. *Proc. 7th. Internat. Speleol. Congr. Sheffield*, 294-296.
- Marker, M. A. (1985): Factors controlling micro-solutional karren on carbonate rocks of the Griqualand West sequence. *Cave Science*, **12**, 61-65.
- Mazari, R. K. (1988): Himalayan karst-karren in Kashmir. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., **32**, 163-178.
- Migoñ, P. (2006): *Granite Landscapes of the World*. Oxford University Press, New York, 384p.
- Mottershead, D. N. (1996): A study of solution flutes (Rillenkarren) at Lluc, Mallorca. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., Suppl. Bd., **103**, 215-241.
- Mottershead, D. N., Moses, C. A. and Lucas, G. R. (2000): Lithological control of solution form: a comparative study. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., **44**, 491-512.
- Osmaston, H. A. and Sweeting, M. M. (1982):

- Geomorphology*. Sarawak Museum Jour. **30** (51), 75-93.
- Palmer, H. S. (1927): Lapiés in Hawaiian basalts. *Geographical Review*, **17**, 627-631.
- Piggott, N. R. and Shakesby, R. A. (1980): Lapiés at Lluch, Mallorca. *Swansea Geographer*, **18**, 54-59.
- Reynolds, D. L. (1961): Lapiés and solution pits in olivine-dolerite sills at Slieve Gullion, Northern Ireland. *Journal of Geology*, **69**, 110-117.
- Sweeting, M. M. (1972): *Karst Landforms*. Macmillan, London, 362p.
- Sweeting, M. M. and Lancaster, N. (1982): Solutional and wind erosion forms on limestone in the Central Namib Desert. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., **26**, 197-207.
- Twidale, C. R. (1982): *Granite Landforms*, Elsevier, Amsterdam, 372p.
- Vincent, P. (1996): Rillenkarren in the British Isles. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., **40**, 487-497.
- Williams, R. B. G. and Robinson, D. A. (1994): Weathering flutes on siliceous rocks in Britain and Europe. In: Robinson, D. A. and Williams, R. B. G. (eds), *Rock Weathering and Landform Evolution*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 413-432.
- (2008年6月4日受付, 2008年7月23日受理)